

METODE PHASENET DALAM INOVASI PREDIKSI GEMPA BUMI: MENUJU SISTEM PERINGATAN DINI YANG EFEKTIF

Refika Ayuna Sari, Adila Alfa Krisnadhi

Fakultas Ilmu Komputer, Magister Ilmu Komputer, Universitas Indonesia, Indonesia
Jl. Prof. Dr. Bahder Djohan, Kampus UI Depok, Pondok Cina, Kecamatan Beji, Kota Depok, Jawa Barat
Refikaayuna15@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia menghadapi ancaman gempa bumi yang signifikan, memerlukan sistem peringatan dini (EEWS) yang akurat dan efisien. Tantangan utama EEWS saat ini adalah akurasi prediksi, yang dapat menyebabkan peringatan palsu atau terlewat. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan prediksi gempa bumi menggunakan metode PhaseNet demi efektivitas sistem peringatan dini. Metode ini melibatkan analisis data seismik dari Geofon, dengan langkah-langkah seperti denoising menggunakan DeepDenoyer, normalisasi, resampling, dan penerapan model PhaseNet untuk mendeteksi fase gelombang P dan S. Inovasi utama adalah integrasi Conformal Prediction (CP) untuk mengukur tingkat kepercayaan hasil prediksi. Evaluasi awal tanpa CP menunjukkan akurasi 68.7% untuk fase P dan hanya 1.3% untuk fase S, dengan kesalahan kalibrasi tinggi (ECE 88.79%) untuk fase P yang mengindikasikan overconfidence model. Namun, setelah menerapkan CP, keandalan prediksi meningkat drastis. Pada tingkat kepercayaan 90% ($\alpha=0.1$), cakupan CP untuk fase P naik menjadi 87.7% dari 68.7%, dan untuk fase S melonjak ke 78.7% dari hanya 1.3%. Peningkatan serupa juga terlihat pada tingkat kepercayaan 80%. Hasil ini membuktikan bahwa CP secara optimal memperbaiki keandalan prediksi, terutama pada fase yang awalnya memiliki kinerja lemah, menjadikan output PhaseNet lebih terpercaya. Integrasi CP dengan PhaseNet menawarkan kerangka kerja yang lebih andal dan krusial bagi mitigasi bencana di wilayah rawan gempa seperti Indonesia.

Kata kunci : *phaseNet method, earth quake, early warning*

1. PENDAHULUAN

Setiap negara di dunia memiliki risiko bencana alam yang berbeda, namun bencana gempa bumi adalah ancaman yang hadir di hampir semua negara. Menurut Caldera dan Wirasinghe (2022), gempa bumi termasuk dalam kategori bencana yang diakibatkan oleh aktivitas geofisika. Secara umum, lebih dari 90% gempa bumi disebabkan oleh pergerakan tektonik di dalam litosfer. Ketika deformasi yang dihasilkan oleh pergeseran ini melebihi batas kekuatan batuan, energi yang terakumulasi selama waktu yang lama akan dilepaskan dengan cepat, menimbulkan getaran yang mengakibatkan gempa bumi [1]

Proses terbentuknya gempa bumi melibatkan interaksi kompleks yang terjadi di bawah permukaan bumi, sehingga sangat sulit untuk diprediksi dengan akurasi tinggi. Lempeng-lempeng tektonik tidak statis; mereka terus bergerak di atas lapisan mantel bumi yang terdiri dari batuan padat dan cair. Pergerakan dua lempeng yang saling bertabrakan, menjauh, atau bergeser akan memicu terjadinya gempa bumi. Indonesia adalah salah satu negara yang sering mengalami aktivitas gempa bumi, karena terletak di pertemuan tiga lempeng utama: Eurasia, Indoaustralia, dan Pasifik, serta dikelilingi oleh rangkaian gunung berapi aktif [2]. Dalam dua dekade terakhir, Indonesia telah mengalami sejumlah gempa bumi signifikan, seperti Gempa Aceh pada tahun 2004, Gempa Nias 2005, Gempa Jogja 2006, Gempa Padang 2009, dan Gempa Palu pada tahun 2018, serta Gempa Lombok pada tahun yang sama. Di awal 2022, gempa juga terjadi di dekat zona Megathrust Sunda di Banten.

Dengan kondisi geologis seperti ini, Indonesia menjadi salah satu negara dengan risiko gempa tertinggi di dunia, terletak di Cincin Api Samudera Pasifik [3].

Menghadapi tantangan ini, diperlukan teknologi yang mumpuni [4]. Teknologi untuk memprediksi datangnya gempa bumi secepat mungkin. Salah satu teknologi yang berkembang saat ini adalah sistem Peringatan Dini Gempa Bumi (Earthquake Early Warning - EEW). Sistem EEW berfungsi untuk memberikan peringatan berdasarkan teori propagasi gelombang seismik, dengan tujuan mengurangi jumlah korban jiwa saat gempa terjadi. Meskipun memiliki manfaat yang signifikan, sistem ini masih menghadapi tantangan dalam hal akurasi. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya peringatan palsu atau melewatkan pemberitahuan saat gempa benar-benar terjadi.

Untuk meningkatkan efektivitas sistem EEW, metode Phasenet kini mulai diterapkan dalam mitigasi bencana [5]. Solusi metode phasenet berpotensi meningkatkan akurasi prediksi gempa, mengurangi risiko peringatan yang tidak akurat dan membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih tepat waktu ketika terjadi bencana. Dengan memanfaatkan algoritma dan analisis data yang kompleks, metode ini dapat menganalisis pola seismik dan memberikan wawasan yang lebih baik mengenai kemungkinan terjadinya gempa bumi. Metode PhaseNet adalah teknik yang digunakan untuk memprediksi dan memantau aktivitas seismik, termasuk gempa bumi, dengan lebih akurat dan efisien. Metode ini berfokus pada analisis gelombang seismik yang dihasilkan saat

terjadinya gempa bumi. PhaseNet menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan gelombang seismik yang dihasilkan oleh gempa bumi [6]. Teknik ini memungkinkan sistem untuk secara otomatis mengidentifikasi fase gelombang S (gelombang geser) dan P (gelombang tekanan) yang muncul saat terjadinya gempa.

Pendekatan ini diharapkan dapat memperkuat upaya mitigasi risiko gempa bumi di Indonesia, serta memberikan solusi yang lebih andal dan responsif dalam menghadapi ancaman bencana alam ini [7]. Melalui pengembangan teknologi yang inovatif dan penerapan sistem peringatan dini yang lebih baik, diharapkan akan ada pengurangan risiko dan perlindungan yang lebih efektif untuk masyarakat yang tinggal di daerah rawan gempa. Upaya kolaboratif antara ilmuwan, peneliti, dan pemerintah sangat dibutuhkan untuk membangun sistem yang tangguh dalam mengantisipasi dan merespons bencana gempa bumi, meminimalkan dampak negatifnya bagi kehidupan manusia [8], [4]

Berdasarkan uraian diatas, maka dapat diajukan pertanyaan penelitiannya adalah, bagaimana metode phasenet dapat memprediksi gempa bumi lebih efektif dan efisien?, sedangkan tujuan penelitiannya adalah untuk mengetahui bagaimana prediksi gempa dengan menggunakan phasenet.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Gempa Bumi di Indonesia

Gempa bumi adalah getaran atau guncangan yang terjadi di permukaan bumi akibat pergeseran tiba-tiba pada lapisan batuan di dalam kerak bumi [3]. Proses ini biasanya disebabkan oleh aktivitas tektonik, seperti pergerakan lempeng bumi, vulkanisme, atau aktivitas seismik lainnya[9]. Gempa bumi dapat bervariasi dalam intensitas dan durasi, serta dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan terhadap infrastruktur, lingkungan, dan bahkan mengancam jiwa. Indonesia, yang terletak di Cincin Api Pasifik, sering mengalami gempa bumi akibat aktivitas lempeng tektonik [10]. Beberapa gempa bumi besar yang pernah terjadi di Indonesia antara lain, pertama Gempa Sumatra (2004). Pada tanggal 26 Desember 2004, gempa berkekuatan 9,1 SR terjadi di lepas pantai Aceh. Gempa ini menyebabkan tsunami yang menghancurkan, menewaskan sekitar 230.000 orang di beberapa negara, termasuk Indonesia, kedua Gempa Yogyakarta (2006), pada 27 Mei 2006, gempa berkekuatan 5,9 SR melanda daerah Yogyakarta dan sekitarnya [11]. Gempa ini mengakibatkan ribuan korban jiwa dan kerusakan parah pada bangunan. Ketiga Gempa Lombok (2018). Tiga gempa besar melanda pulau Lombok pada bulan Juli dan Agustus 2018, dengan magnitudo mencapai 7,0 SR. Gempa-gempa ini menyebabkan kerusakan luas dan pengungsian massal [12]. Gempa bumi tersebut menunjukkan betapa pentingnya kesiapsiagaan dan mitigasi bencana di Indonesia[11].

2.2. Metode Phasenet

Metode PhaseNet adalah teknik yang digunakan dalam pemantauan dan analisis gempa bumi dengan memanfaatkan data dari jaringan seismik. Metode ini berfokus pada pengidentifikasian dan pengklasifikasian fase gelombang seismik (seperti P-wave dan S-wave) dari sinyal yang diterima oleh seismometer [13]. Dengan meningkatkan keakuratan deteksi fase gelombang ini, PhaseNet berpotensi untuk memperbaiki pemodelan dan prediksi gempa bumi.

Metode PhaseNet mengandalkan algoritma pembelajaran mendalam (deep learning) untuk menganalisis data seismik dan secara otomatis mendeteksi fase gelombang. Ini memungkinkan sistem untuk belajar dari data latih dan meningkatkan akurasi deteksinya seiring waktu. Dengan memanfaatkan berbagai fitur dari data seismik, seperti waktu kedatangan gelombang dan amplitudo, PhaseNet dapat memberikan informasi yang lebih baik mengenai lokasi, magnitudo, dan karakteristik gempa bumi [14],[4]

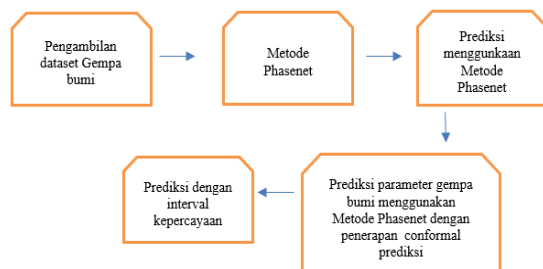
Dalam konteks prediksi gempa, metode ini dapat membantu memperbaiki sistem alarm dini dengan memberikan informasi lebih cepat dan lebih akurat tentang pergerakan gelombang seismik. Meskipun tidak dapat memprediksi kapan tepatnya gempa akan terjadi, PhaseNet dapat meningkatkan pemahaman tentang pola seismik dan memberikan waktu lebih untuk persiapan menghadapi potensi risiko.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan identifikasi masalah, yang mana isu yang diangkat adalah meskipun penerapan model AI seperti PhaseNet dapat meningkatkan kinerja dalam deteksi gempa, masih terdapat tantangan dalam mengukur kepercayaan terhadap hasil prediksi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan tambahan untuk memberikan tingkat keyakinan dalam mendeteksi gempa bumi berdasarkan berbagai parameter seperti fase gelombang, magnitudo, dan lokasi gempa. Salah satu pendekatan tersebut adalah menggunakan metode PhaseNet. Setelah mengidentifikasi masalah, dilakukan pengumpulan data yang diperlukan untuk penelitian. Proses pengumpulan data dilakukan melalui tinjauan literatur dan pengumpulan dataset. Tinjauan literatur mencakup pencarian dan pengumpulan teori-teori dari sumber yang relevan, baik dari buku maupun jurnal di internet, yang meliputi teori prediksi, gempa bumi, dan penggunaan Obspy. Dataset yang digunakan diambil dari website Geofon dengan menggunakan Obspy, dengan periode waktu yang mencakup tahun 2025. Setelah data terkumpul, langkah selanjutnya adalah memproses data untuk memprediksi berbagai parameter gempa seperti fase gelombang, magnitudo, dan lokasi dengan menggunakan model PhaseNet.

Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya meningkatkan keandalan prediksi gempa melalui metode yang lebih komprehensif. Selain penggunaan PhaseNet, diperlukan integrasi teknologi mutakhir dan

algoritma lain yang dapat meningkatkan ketepatan deteksi serta prediksi parameter gempa. Dalam pengembangan model, penyesuaian parameter model menjadi krusial untuk mempertimbangkan variasi seismik regional. Metode verifikasi dan validasi hasil prediksi juga harus diperkuat dengan pengujian berulang menggunakan data yang berbeda. Selain itu, kolaborasi dengan ahli geofisika dapat membantu dalam penafsiran hasil dan pengembangan lebih lanjut. Upaya ini diharapkan dapat mendukung mitigasi risiko bencana dengan memberikan informasi yang lebih dapat diandalkan bagi masyarakat dan pembuat kebijakan.



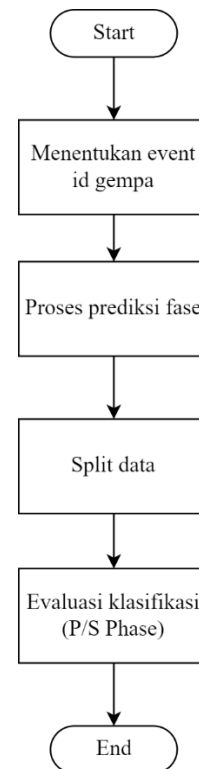
Gambar 1. Disain Penelitian

Desain penelitian yang telah digambarkan pada diawali dengan menggunakan dataset gempa bumi dengan proses menentukan event id gempa bumi yang diambil dari situs Geofon (<https://geofon.gfz.de/>), yang merupakan layanan katalog gempa bumi global yang menyediakan informasi waktu, lokasi, dan magnitudo kejadian gempa.

Selanjutnya dilakukan eksperimen pendahuluan dengan menggunakan metode PhaseNet yang digunakan untuk memprediksi phase wave, setelah dilakukan eksperimen pendahuluan kemudian didapatkan hasil prediksi, dan selanjutnya dilakukan penerapan *conformal prediction* untuk mengukur tingkat cakupan (*coverage*) dari hasil prediksi, dan hal tersebut menjadi fokus pada penelitian [15]. Terakhir, didapatkan hasil prediksi dengan menerapkan tingkat cakupan (*coverage*) menggunakan *conformal prediction*. Eksperimen ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi dan keyakinan terhadap prediksi fase gelombang gempa. Dengan menggunakan metode PhaseNet, sistem dapat mengidentifikasi fase gelombang secara lebih efisien [16]. Setelah mendapatkan hasil prediksi awal, *conformal prediction* diterapkan untuk menilai dan memperkuat tingkat kepercayaan prediksi tersebut. Teknik ini memungkinkan penyesuaian pada tingkat keyakinan yang diperlukan dalam analisis prediksi, memastikan bahwa hasil yang diperoleh tidak hanya akurat tetapi juga andal. Pendekatan ini memungkinkan untuk mengidentifikasi batasan kepercayaan yang lebih jelas, yang sangat penting dalam konteks mitigasi bencana. Selain itu, percobaan ini dapat memberikan wawasan baru dalam bagaimana teknologi prediktif dapat dioptimalkan untuk aplikasi

seismologi. Implementasi hasil dari eksperimen ini dapat meningkatkan kesiapsiagaan dan respons terhadap gempa bumi dengan informasi yang lebih solid dan diverifikasi. Harapannya, penelitian ini juga dapat membuka jalan bagi studi lanjutan mengenai penggunaan teknologi prediktif dalam berbagai disiplin ilmu yang memerlukan prediksi berbasis data.

Pada tahap awal penelitian membuat rancangan awal metode phasenet yaitu :



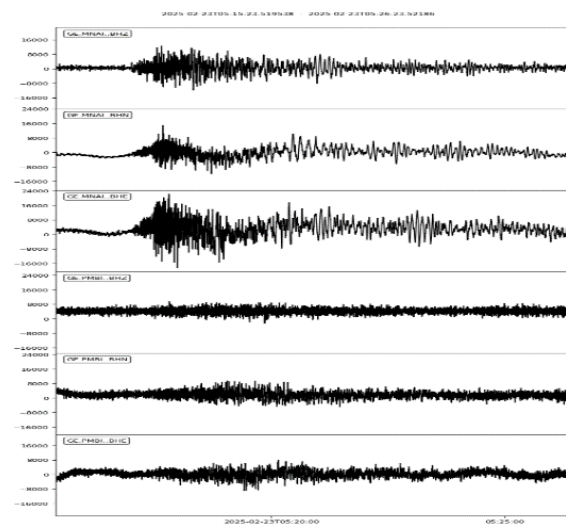
Gambar 2. Rancangan awal Phaset

Diagram alur tersebut menggambarkan proses evaluasi klasifikasi fase gempa dimulai dari langkah "Start". Langkah pertama adalah "Menentukan event id gempa", di mana sistem mengidentifikasi dan mencatat informasi mengenai event gempa yang terjadi. Setelah itu, proses berlanjut ke langkah "Proses prediksi fase". Pada tahap ini, sistem menggunakan data yang ada untuk memprediksi fase atau tahap perkembangan gempa. Langkah berikutnya adalah "Split data", di mana data yang telah dikumpulkan dan dianalisis sebelumnya dibagi menjadi bagian-bagian yang relevan untuk digunakan dalam pemodelan atau evaluasi lebih lanjut. Terakhir, langkah "Evaluasi klasifikasi (P/S Phase)" dilakukan, di mana hasil prediksi dibandingkan dengan data aktual untuk mengevaluasi akurasi dalam mengklasifikasikan fase primer (P) dan sekunder (S) dari gempa. Diagram ini diakhiri dengan langkah "End", menandakan selesainya proses evaluasi ini. Alur ini menggambarkan serangkaian langkah terorganisir yang dirancang untuk memastikan prediksi fase gempa dilakukan dengan tepat dan akurat.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan *flowchart* metode usulan yang telah tergambar pada proses pertama yaitu mengimpor beberapa *library* seperti *pandas* dan *numpy* untuk pengolahan data, *obspy* untuk membaca dan memproses data seismic dalam format MiniSEED, serta *seisbench.models* untuk memanggil model PhaseNet dan DeepDenoiser yang sudah dilatih sebelumnya [17]. Model PhaseNet digunakan untuk mendeteksi fase P dan S pada sinyal seismic, sedangkan DeepDenoiser berfungsi untuk mereduksi *noise* pada data mentah sebelum dilakukan klasifikasi fase.

Selanjutnya, direktori dataset dibaca untuk memperoleh seluruh daftar event ID yang akan diproses. Untuk setiap setiap *event*, program mencari file data seismic *.mseed* dan file *ground truth* hasil penentuan manual waktu kedatangan fase. Jika *ground truth* tidak ditemukan, event tersebut dilewati agar tidak menimbulkan kesalahan dalam evaluasi model. Data *ground truth* tersebut dimuat ke dalam bentuk DataFrame dan disesuaikan kolomnya agar hanya menyertakan informasi penting seperti nama stasiun, jenis fase (P/S), serta waktu kedatangan dalam format *datetime*. Sementara itu, untuk setiap file MiniSEED dalam event yang sama, data seismic dibaca menggunakan fungsi *read()* dari *ObsPy*, kemudian hanya kanal BHZ, BHN, dan BHE yang dipilih agar mewakili komponen vertikal dan horizontal dari getaran tanah [18].



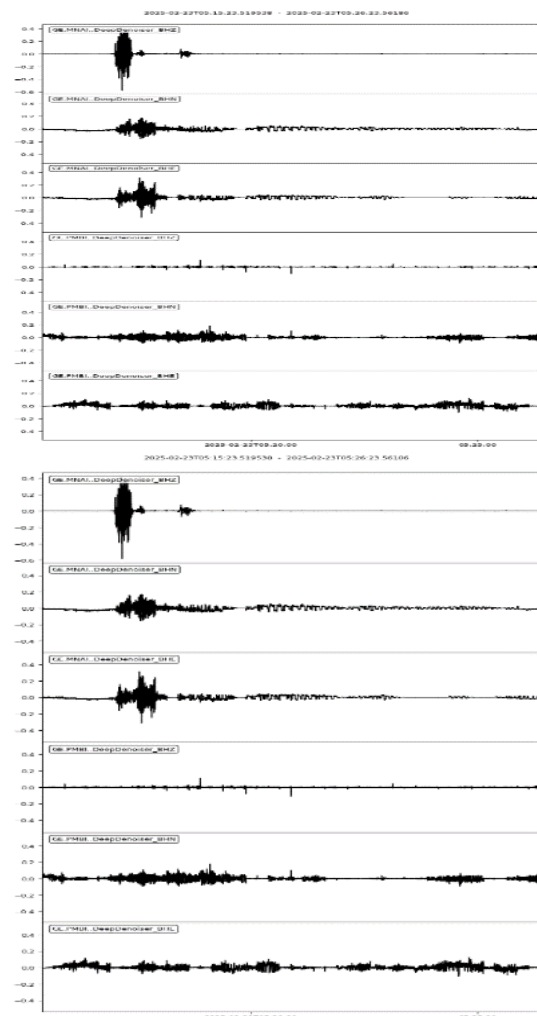
Gambar 3. Waveform tiga komponen dari stasiun MNAI dan PMBI

Sebelum dilakukan penjelasan lebih lanjut, dilakukan visualisasi dengan menggunakan salah satu event yaitu *gfz2025dtgc*, yang kemudian file dibaca hasilnya berupa enam *trace* dari dua stasiun seismic, yaitu MNAI dan PMBI masing-masing dengan tiga komponen utama yaitu BHZ, BHN, BHE. Setiap *trace* memiliki frekuensi sampling sebesar 20 Hz dengan total 13.201 sampel. Selanjutnya, dilakukan proses seleksi kanal untuk memfilter data agar mencakup

komponen BHZ, BHN, dan BHE, sehingga data yang digunakan dalam analisis selanjutnya hanya terdiri dari sinyal pada tiga arah utama gerakan tanah di kedua stasiun tersebut. Visualisasi hasil dari proses tersebut dapat dilihat pada gambar 3.

Setelah normalisasi, dilakukan proses denoising menggunakan model DeepDenoiser yang diimplementasikan melalui pustaka *SeisBench*. Model ini berbasis *deep learning* yang telah dilatih secara *pretrained* untuk mengenali dan menghilangkan *noise* pada sinyal seismic tanpa mengubah karakteristik utama gelombangnya.

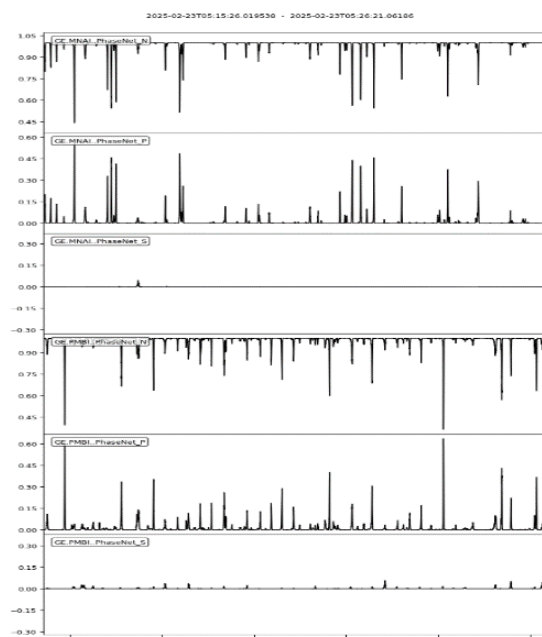
Proses ini menghasilkan stream baru (*st_denoiser*) yang berisi sinyal *signal-to-noise ratio*, SNR yang lebih tinggi. Hasilnya kemudian divisualisasikan dalam bentuk *waveform* hasil denoising, yang memperlihatkan bentuk gelombang yang lebih bersih dan mudah diidentifikasi dibandingkan dengan data sebelum pembersihan. Berikut pada Gambar 4 merupakan visualisasi *waveform* hasil *denoising* menggunakan model DeepDenoiser untuk menghilangkan derau dari sinyal seismic



Gambar 4. Waveform hasil *denoising* menggunakan model DeepDenoiser

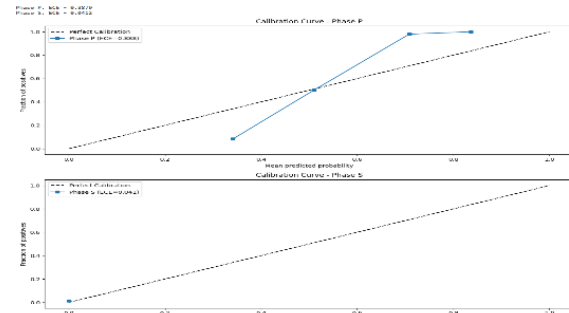
Selanjutnya digunakan model PhaseNet yang telah dilatih dari pustaka SeisBench dengan basis data GEOFON. Setelah proses denoising, sinyal kemudian dilakukan proses lanjutan menggunakan model PhaseNet yang telah dilatih sebelumnya pada dataset GEOFON. Model ini menghasilkan anotasi probabilitas untuk setiap trace, yang merepresentasikan kemungkinan kemunculan fase P dan S pada setiap titik waktu dalam sinyal [19].

Input yang digunakan adalah sinyal hasil denoising (st_denoiser) sehingga derau telah diminimalkan sebelum analisis. Hasil keluaran (annotations) berisi nilai probabilitas deteksi fase P dan S, yang selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan waktu tiba (*arrival time picking*) secara otomatis atau divisualisasikan pada bentuk waveform dan dapat dilihat pada gambar 5.



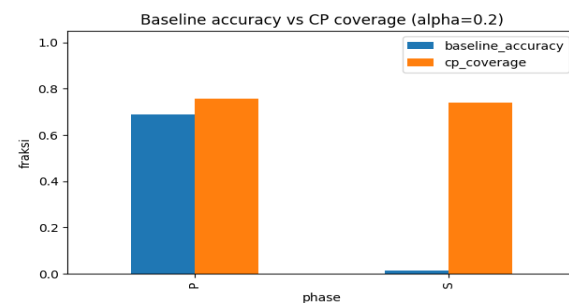
Gambar 5. Visualisasi hasil deteksi fase seismik (P dan S) menggunakan model PhaseNet pada sinyal hasil denoising

Selanjutnya dilakukan evaluasi reliabilitas probabilistik model PhaseNet dengan menghitung *Expected Calibration Error* (ECE) serta membuat kurva kalibrasi untuk masing-masing jenis fase seismic, yaitu fase P dan S. Grafik menampilkan hubungan antara rata-rata probabilitas yang diprediksi model dan proporsi kejadian aktual. Garis diagonal putus-putus (“Perfect Calibration”) menunjukkan kondisi ideal di mana prediksi model benar-benar seimbang dengan hasil aktual. Jika kurva hasil prediksi mendekati garis diagonal tersebut, berarti model memiliki kalibrasi probabilitas yang baik, sedangkan deviasi yang besar menunjukkan adanya *overconfidence* atau *underconfidence* dalam prediksi probabilitas model.



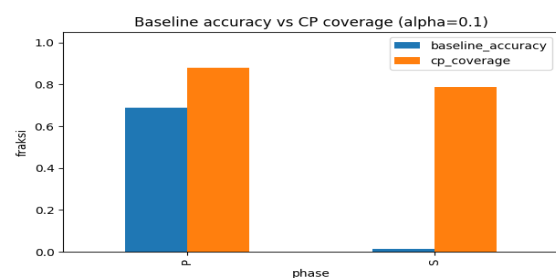
Gambar 6. Calibration Curve Phase P dan S Tanpa Menggunakan Conformal Prediction

Selanjutnya ditampilkan grafik baseline accuracy dibandingkan CP Coverage yang dihasilkan oleh metode CP untuk masing-masing fase (P dan S) pada dua nilai parameter α yaitu 0.2 dan 0.1.



Gambar 7. Baseline accuracy dibandingkan CP Coverage ($\alpha = 0.2$)

Berdasarkan gambar 7 untuk α yaitu 0.2 terdapat peningkatan CP Coverage dibandingkan dengan baseline tetap terlihat, namun sedikit lebih rendah, yaitu sekitar 0.75 untuk phase P dan sekitar 0.74 untuk phase S. Terjadi penurunan yang wajar dibandingkan α yaitu 0.1 karena semakin besar nilai α maka interval CP yang dihasilkan semakin sempit.



Gambar 8. Baseline accuracy dibandingkan CP Coverage ($\alpha = 0.1$)

Berdasarkan Gambar 8. untuk α yaitu 0.1 nilai CP Coverage meningkat secara signifikan dibandingkan dengan baseline accuracy pada kedua fase. Misalnya, pada phase P cakupan meningkat dari sekitar 0.69 menjadi 0.88, sedangkan pada phase S meningkat dari 0.01 menjadi sekitar 0.79. Hal tersebut menandakan bahwa penerapan CP dengan tingkat kepercayaan tinggi mampu memperluas interval prediksi [20].

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pemanfaatan metode PhaseNet dalam prediksi gempa bumi difokuskan pada peningkatan efektivitas sistem peringatan dini (EEW) dengan secara akurat dan efisien mengidentifikasi serta mengklasifikasikan fase gelombang seismik. Proses ini diawali dengan pengumpulan data gempa bumi dari sumber seperti situs Geofon, yang menyediakan informasi waktu, lokasi, dan magnitudo kejadian. Data mentah kemudian mengalami serangkaian prapemrosesan meliputi normalisasi untuk menyetarakan skala amplitudo, resampling untuk menyeragamkan resolusi temporal menjadi 100 Hz, dan denoising menggunakan model DeepDenoiser. Tahap denoising ini krusial untuk menghilangkan gangguan pada sinyal seismik sebelum klasifikasi fase. Setelah data bersih, model PhaseNet, yang merupakan algoritma pembelajaran mendalam, diaplikasikan untuk menghasilkan anotasi probabilitas kemunculan fase P dan S pada setiap titik waktu sinyal. Ini memungkinkan penentuan waktu tiba fase P dan S secara otomatis berdasarkan ambang probabilitas tertentu. Informasi waktu kedatangan gelombang ini selanjutnya digunakan untuk memperkirakan lokasi dan magnitudo gempa. Meskipun PhaseNet menunjukkan kinerja awal yang baik dalam deteksi P-fase, keandalannya untuk S-fase tergolong rendah. Untuk mengatasi tantangan ini, penelitian ini mengintegrasikan conformal prediction untuk mengukur tingkat kepercayaan atau cakupan hasil prediksi. Penerapan conformal prediction terbukti secara signifikan meningkatkan cakupan prediksi untuk kedua fase, terutama S-fase, yang sebelumnya memiliki akurasi sangat rendah. Ini berarti bahwa PhaseNet, khususnya ketika dilengkapi dengan conformal prediction, dapat memberikan prediksi waktu kedatangan fase P dan S dengan interval kepercayaan yang lebih andal, sehingga memungkinkan sistem peringatan dini gempa bumi untuk memberikan informasi yang lebih cepat, akurat, dan dapat dipercaya kepada masyarakat. Dengan demikian, PhaseNet tidak memprediksi kapan gempa akan terjadi, melainkan meningkatkan pemahaman dan respons terhadap kejadian gempa yang sedang berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Yan, X. Chen, H. Sun, J. Xu, and J. Zhou, "A review of tidal triggering of global earthquakes," *Geod Geodyn*, vol. 14, no. 1, pp. 35–42, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.geog.2022.06.005.
- [2] A. Jufriansah, Y. Pramudya, A. Khusnani, and S. Saputra, "Analysis of Earthquake Activity in Indonesia by Clustering Method," *Journal of Physics: Theories and Applications*, vol. 5, no. 2, p. 92, Sep. 2021, doi: 10.20961/jphystheor-appl.v5i2.59133.
- [3] U. Wijaya, Kusrini, and A. H. Muhammad, "Indonesian Seismic Mitigation using Earthquake Predicted Artificial Intelligence Model," in *2022 5th International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, IEEE, Aug. 2022, pp. 349–354. doi: 10.1109/ICOIACT55506.2022.9972091.
- [4] M. Mubasyira *et al.*, "The Need Analysis for WriteMI Application as Digital Basic Writing Teaching Materials Based on Multiple Intelligences Approach," *Int J Adv Sci Eng Inf Technol*, vol. 15, no. 3, pp. 968–976, Jun. 2025, doi: 10.18517/ijaseit.15.3.20207.
- [5] H. Putranta, W. N. Wahiddayah, and L. Yuliani, *Modul Edukasi Mitigasi Bencana*. Yogyakarta: IAINYogyakarta, 2024.
- [6] S. Sudarto and K. Kusrini, "Klasifikasi Tsunami Gempa Bumi dengan Teknik Stacking Ensemble Machine Learning," *Jurnal Informatika Polinema*, vol. 10, no. 4, pp. 511–520, Aug. 2024, doi: 10.33795/jip.v10i4.5655.
- [7] S. Widiyanto, D. Sunendar, M. Vernia, S. Alifah, H. A. Suprpto, and A. W. Leksono, "Learning Dayak Literature through Information Systems," vol. 13, no. 6, 2023.
- [8] F. P. Putra, U. Harmoko, and G. Yuliyanto, "Comparison Of Earthquake Hypocenter Relocation Methods In The Java Region, Indonesia," *Cognizance Journal of Multidisciplinary Studies*, vol. 3, no. 11, pp. 226–235, Nov. 2023, doi: 10.47760/cognizance.2023.v03i11.015.
- [9] Y. Syafitri, B. Bahtiar, and L. A. Didik, "Analisis Pergeseran Lempeng Bumi Yang Meningkatkan Potensi Terjadinya Gempa Bumi Di Pulau Lombok," *Konstan - Jurnal Fisika Dan Pendidikan FISIKA*, vol. 4, no. 2, pp. 139–146, Jan. 2020, doi: 10.20414/konstan.v4i2.43.
- [10] M. Azmi Zakaria and A. Abdul Aziz, "The Impact of Digital Storytelling on ESL Narrative Writing Skill," *Arab World English Journal*, no. 5, pp. 319–332, Jul. 2019, doi: 10.24093/awej/call5.22.
- [11] M. Ruhimat and Y. Malik, "Memahami Bahaya Gempa Dan Tsunami Melalui Pembelajaran Geografi," *Jurnal Geografi Gea*, vol. 10, no. 1, Mar. 2016, doi: 10.17509/gea.v10i1.1662.
- [12] D. Sungkawa, "DAMPAK GEMPA BUMI TERHADAP LINGKUNGAN HIDUP," *Jurnal Geografi Gea*, vol. 7, no. 1, Mar. 2016, doi: 10.17509/gea.v7i1.1706.
- [13] A. Khusnani, A. Jufriansah, K. W. Wae, D. Sulistyaningsih, and M. Margiono, "Aktivitas Seismik Gempa Bumi Laut Flores: Periode 30 Tahun," *DIFRACTION*, vol. 6, no. 1, pp. 46–57, Jun. 2024, doi: 10.37058/diffraction.v6i1.8836.
- [14] D. Siska, "Kaitan Antara Teori Gelombang Dan Jalur Rekahan Gempa Bumi Melalui Array Response Function," *Techsi - Jurnal Teknik Informatika*, Vol. 7, No. 1, pp. 156–167, Mar. 2019, doi: 10.29103/techsi.v7i1.185.

- [15] A. Fatimah, K. D. Tania, and A. Meiriza, "ANALISIS KOMPARATIF MODEL DATA MINING DALAM PREDIKSI KETEPATAN PENYELESAIAN SERVICE LEVEL AGREEMENT," *JOISIE (Journal Of Information Systems And Informatics Engineering)*, vol. 9, no. 1, p. 100, Jun. 2025, doi: 10.35145/joisie.v9i1.4943.
- [16] R. Y. Mardiansyah, B. Kurniawan, S. Soekirno, and D. E. Nuryanto, "Optimalisasi Saluran Komunikasi Berbasis Gelombang Mikro Sebagai Alternatif Sistem Pemantauan Curah Hujan," *Elektron : Jurnal Ilmiah*, pp. 21–29, Jul. 2022, doi: 10.30630/eji.14.1.278.
- [17] W. Zhu and G. C. Beroza, "PhaseNet: A Deep-Neural-Network-Based Seismic Arrival Time Picking Method," *Geophys J Int*, Oct. 2018, doi: 10.1093/gji/ggy423.
- [18] J. Vazquez and J. C. Facelli, "Conformal Prediction in Clinical Medical Sciences," *J Healthc Inform Res*, vol. 6, no. 3, pp. 241–252, Sep. 2022, doi: 10.1007/s41666-021-00113-8.
- [19] R. V. Nahari, M. Ulum, and R. Alfita, *EKSTRASI FITUR BERBASIS PENGOLAHAN SINYAL DIGITAL*. Ponorogo: Wade Grup, 2021.
- [20] I. A. Zavedevkin, A. A. Shakirova, and P. P. Firstov, "DrumCorr program for selecting volcanic earthquake multiplets based on cross-correlation analysis," *J Phys Conf Ser*, vol. 2094, no. 3, p. 032048, Nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2094/3/032048